

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 ..... 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 ..... 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 ..... 张江艳 (1888)

基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 ..... 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)

高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 ..... 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)

北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 ..... 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)

碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 ..... 吴雪萍 (1926)

中国城市PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>时空分布特征和影响因素分析 ..... 李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)

2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>时空变化特征及影响因素 ..... 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)

疫情管控期西安PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>污染特征及成因分析 ..... 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)

苏南五市秋冬季PM<sub>2.5</sub>化学组成特征和空间差异 ..... 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)

湖北咸宁细颗粒物PM<sub>2.5</sub>来源 ..... 罗怡, 朱宽广, 陈璞琬, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)

邢台氨减排对京津冀PM<sub>2.5</sub>改善的溢出效益 ..... 边泽君, 闻超玉, 郎建垒, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)

聊城市冬季PM<sub>2.5</sub>载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 ..... 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)

高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 ..... 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 ..... 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海滨, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 ..... 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)

水环境中抗病毒毒物的存在、行为与风险 ..... 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)

黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 ..... 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)

藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素 ..... 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)

西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 ..... 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)

基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 ..... 孟令华 (2096)

丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 ..... 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 ..... 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 ..... 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王楠楠 (2129)

典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 ..... 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)

抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 ..... 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)

过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 ..... 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲子, 李大鹏, 黄勇 (2160)

矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 ..... 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张彤 (2171)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 ..... 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)

微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 ..... 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠军, 陈波 (2195)

紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 ..... 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)

土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 ..... 郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)

鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 ..... 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 ..... 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琼, 周瑞娟, 李霖 (2233)

污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 ..... 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)

宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 ..... 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)

大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 ..... 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)

基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 ..... 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)

秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 ..... 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)

长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 ..... 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)

土壤盐分变化对N<sub>2</sub>O排放影响:基于Meta分析 ..... 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)

基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 ..... 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 ..... 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)

防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 ..... 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)

长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 ..... 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)

冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 ..... 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 ..... 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)

高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 ..... 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)

生物炭与不同类型氮肥施肥对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 ..... 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)

大岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 ..... 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 ..... 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郇允兵 (2417)

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 ..... 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)

西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 ..... 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)

重庆某铁矿周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 ..... 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 ..... 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 ..... 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 ..... 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

# 基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测

郑慧玲<sup>1</sup>, 郑辉峰<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2. 中国人民解放军93617部队, 北京 101400)

**摘要:** 土地利用/覆被变化会增加区域碳储量或引发碳损耗, 进而影响全球气候. 研究湾区土地利用与碳储量变化的影响机制, 对区域生态系统保护及社会经济可持续发展具有重要意义. 基于InVEST模型和PLUS模型, 分析了粤港澳大湾区土地利用与碳储量的动态变化特征及影响机制, 进一步模拟预测了2030年3种发展情景(自然趋势情景、建设用地优先情景和生态优先情景)下土地利用类型变化对碳储量的影响. 结果表明: ①2000~2020年粤港澳大湾区的耕地(减少5.38%)和建设用地(增加8.68%)变化最显著, 其余用地类型的变化较小. 林地作为大湾区的主要用地类型, 同样也是重要的碳库, 空间上集中分布于东、北、西三面的台地和丘陵地区, 碳储存低值区集中于中部平原, 以建设用地为主. ②受不同用地类型相互转化的影响, 粤港澳大湾区的碳损失了 $20.12 \times 10^6$  Mg. 耕地和林地面积的减少以及建设用地面积的增加是碳损耗的主要原因. ③模拟研究发现生态保护措施将有效提高区域碳储量. 具体来说, 当耕地、林地和草地向建设用地的转化减少20%, 湿地和水体向建设用地的转化减少30%时(生态优先情景), 区域碳储量可增加 $2.58 \times 10^6$  Mg. 研究结果可以为土地利用和城市发展规划的制定提供理论依据, 促进粤港澳大湾区“碳达峰 碳中和”目标的实现.

**关键词:** 土地利用/覆被(LULC); 碳储量; InVEST模型; PLUS模型; 粤港澳大湾区(GBA)

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2321-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202304158

## Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

ZHENG Hui-ling<sup>1</sup>, ZHENG Hui-feng<sup>2</sup>

(1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. People's Liberation Army of China Unit 93617, Beijing 101400, China)

**Abstract:** Land use/land cover (LULC) changes promote regional carbon storage capacity or trigger carbon depletion, which in turn result in a significant impact on global climate change. Understanding the impact of LULC on carbon storage changes in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area plays a vital role in regional ecosystem conservation and sustainable socio-economic development. The present study used the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (the Greater Bay Area, GBA) as an example to analyze the relationship between LULC and carbon storage combined with the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) and Patch-generating Land Use Simulation (PLUS) model. We further predicted the variation in carbon storage through the change in LULC types under three scenarios (natural trend scenario, NT; built-up land priority scenario, BP, and ecological priority scenario, EP) in 2030. The results showed that cropland (which decreased by 5.38%) and built-up land (which increased by 8.68%) underwent the most significant changes over the past 20 years, whereas forest, grassland, wetland, water, and bare land showed a lesser degree of change. Forests, as the dominant land type, were also the most important carbon pool with high carbon storage, which was distributed in mountains and hills in the east, north, and west. By contrast, areas with low carbon storage were widely distributed in built-up land of urban metropolitan regions. We noticed that the carbon storage in the GBA lost  $20.12 \times 10^6$  Mg due to the increasing of built-up land and the decreasing of cropland and forest, whereas ecological protection measures would effectively enhance regional carbon storage. Specifically, the regional carbon storage could be increased by  $2.58 \times 10^6$  Mg when the conversion of cropland, forest, and grassland into built-up land was reduced by 20%, and the conversion of wetland and water into built-up land was reduced by 30% (under the EP). The present study could be a valid reference for managers to develop policies in more reasonable planning of land use and urban development to achieve carbon peaking and carbon neutrality (“Dual Carbon” goals).

**Key words:** land use/land cover (LULC); carbon storage; InVEST model; PLUS model; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA)

大气二氧化碳浓度升高引起的全球变暖导致生态系统服务和生物多样性退化, 进而影响人类生活和生态健康<sup>[1,2]</sup>. 因此, 增加地球生态系统碳储量, 减少碳排放已成为社会发展共识<sup>[3]</sup>. 陆地生态系统作为全球碳储存的重要组成部分, 通过生物量捕获大气中的二氧化碳, 成功减缓了气候变化<sup>[4]</sup>. 有研究表明土地利用是地表系统最直观和最广泛的代表<sup>[5]</sup>, 涵盖了地上生物量、地下生物量、土壤生物量和死亡生物量这4种碳储存载体<sup>[6]</sup>. 由于不同土地利用类型的固碳能力存在显著差异, 其变化直接影响植被

和土壤的分布, 进而改变了陆地生态系统的碳储量<sup>[7]</sup>. Zhang等<sup>[8]</sup>研究表明, 1980~2010年的土地利用变化导致中国陆地生态系统的碳损失了279 Tg. 政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)报告指出, 土地利用变化导致碳以 $1.5 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率释放到大气中, 这表明土地利用变化极大地影响了全球陆地生态系统的碳循环<sup>[9,10]</sup>.

收稿日期: 2023-04-19; 修订日期: 2023-06-26

作者简介: 郑慧玲(1994-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为海岸带地区土地利用与碳储量变化, E-mail: zhl5765@stu.ouc.edu.cn

因此, 根据土地利用类型的变化分析区域碳储量的动态特征成为学者们关注的重要内容, 包括土地利用结构变化引起的碳平衡变化<sup>[11]</sup>、未来情景下的碳储存潜力<sup>[12]</sup>以及土地资源管理对碳平衡的影响等<sup>[13]</sup>.

已有研究中碳储量的计算包括2类研究方法, 一类是借助地球物理和化学过程进行量化评价的实地调查法, 主要应用于小尺度地区<sup>[14]</sup>; 另一类是基于不同土地利用类型碳密度的综合模型算法, 多运用于中宏观尺度<sup>[15]</sup>. 第二类方法的可操作性强, 应用较广, 在此基础上学者们通过CA-Markov模型对未来的土地利用类型进行了模拟<sup>[16-18]</sup>, 进一步应用InVEST模型计算区域未来的碳储量<sup>[19]</sup>. 例如, Liang等<sup>[4]</sup>、Nie等<sup>[10]</sup>和Liu等<sup>[20]</sup>应用第二类方法对中国黄土高原地区、广西南宁和海南岛的土地利用类型与碳储量的动态演变特征进行了分析, 研究结果为区域发展规划制定提供了理论依据.

粤港澳大湾区作为中国开放程度最高、经济活力最强和人口最密集的区域之一, 经历了快速的城市扩张和经济发展<sup>[21]</sup>, 此过程不可避免地导致区域碳排放增加, 影响了生态系统的平衡. 有研究表明, 广东省碳储量高值区分布在建设用地少、生态用地多且连片的粤北地区, 低值区分布在国土开发强度和生态用地破碎化程度高的珠江三角洲地区<sup>[22, 23]</sup>. 此外, 吴隽宇等<sup>[24, 25]</sup>和林媚珍等<sup>[26]</sup>对粤港澳大湾区不同时期的碳储量和生态系统服务价值变化进行了研究, 揭示了其动态变化的过程及影响因素. 尽管学者们针对粤港澳大湾区的碳储量变化进行了研究, 然而, “碳达峰 碳中和”发展目标下, 粤港澳大湾区该如何减排, 如何协调区域发展和生态系统的关系, 这一系列问题的解决既需要掌握土地利用类型与碳储量的影响机制, 也需要进行未来土地利用类型和碳储量的模拟分析. 基于此, 本文首先分析2000~2020年粤港澳大湾区土地利用类型和碳储量的动态变化特征, 通过揭示二者的影响过程模拟2030年不同情景下(自然趋势情景、建设用地优先情景和生态优先情景)的土地利用类型和碳储量; 然后基于研究结果为“双碳”目标下粤港澳大湾区的国土空间规划提出建议.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

粤港澳大湾区位于珠江流域下游, 包括广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门和肇庆这9个地级市, 及香港和澳门这2个特别行政区, 陆地总面积约5.6万 km<sup>2</sup>(图1). 研究区地理位置优越(21°34'~24°23'N, 111°21'~115°25'E), “三面环

山, 三江汇聚”, 具有漫长的海岸线、良好的港口群和广阔的海域面, 东、西、北三面丘陵台地环抱, 中部平原广阔. 气候类型为亚热带湿润季风气候, 年均温度为21~22℃, 年降水量为1 600~2 000 mm. 粤港澳大湾区是国务院2015年提出的战略规划, 是珠江三角洲最重要的经济中心之一. 2020年末常住人口达8 617.19万人, 地区生产总值为11.5万亿元(港币和澳门币已换算为人民币, 下同), 占全国6%的人口和9.5%的经济总量, 是全球四大湾区之一, 也是我国建设高质量发展的世界级城市群的重要载体.

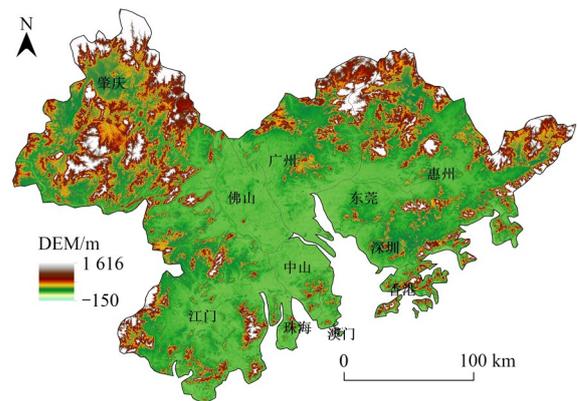


图1 研究区域示意  
Fig. 1 Study area

### 1.2 研究数据

土地利用数据源于GlobalLand ([www.globallandcover.com](http://www.globallandcover.com)), 分辨率为30 m, 选择研究区2000、2010和2020年的土地覆被数据, 结合实际情况将地类合并为耕地、林地、草地、湿地、水体、建设用地和裸地这7种类型. 土地利用类型的碳密度数据分为地上生物、地下生物、土壤有机质和死亡有机质这4类. 参考相关研究结果<sup>[20, 22-24, 26, 27]</sup>, 总结出适用于本研究区域的碳密度数据, 如表1所示.

模拟未来土地利用类型的驱动因子数据来源于地理空间数据云、中国科学院资源环境科学与数据中心和OpenStreetMap(OSM), 具体信息如表2所示.

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 土地利用动态变化分析

研究采用土地利用转移矩阵对其动态变化过程进行分析, 主要借助ArcGIS 10.2中的Field Calculator和Origin 2022绘制土地利用转换的空间位置图和转移矩阵图. 矩阵变化公式如下:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

表1 不同土地利用类型的碳密度/Mg·hm<sup>-2</sup>  
Table 1 Carbon density of each LULC type/Mg·hm<sup>-2</sup>

类型	地上生物	地下生物	土壤有机质	死亡有机质
耕地	7.74	5.26	57.83	1.32
林地	28.38	10.82	95.35	2.15
草地	14.29	15.19	75.7	8.46
湿地	20.75	13.6	160.42	2.65
水体	0	0	0	0
建设用地	0	0	20.78	0
裸地	1.82	0	15.88	0

表2 模拟土地利用类型的驱动因子数据  
Table 2 Details of driving factors data

数据类型	年份	分辨率/m	数据源
DEM	2010	30	地理空间数据云( <a href="http://www.gscloud.cn">http://www.gscloud.cn</a> )
降水			
气温	2000和2010	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )
人口密度			
NDVI			
距道路距离			
距铁路距离	2020	1 000	OSM( <a href="https://www.openstreetmap.org">https://www.openstreetmap.org</a> )
距水体距离			

式中,  $P$ 为不同年份间土地利用的转移矩阵, 矩阵中的元素 $p_{ij}$ 为类型 $i$ 转移到类型 $j$ 的概率或绝对面积.

### 1.3.2 土地利用类型模拟分析

首先, 确定影响土地利用变化的自然和社会因子, 基于可获得的10个因子数据, 利用PLUS模型中的用地扩张分析策略(LEAS)模块计算各种土地利用类型的发展概率. 之后基于CA-Markov模型对研究区的土地利用状况进行模拟. 相关计算公式如下:

(1) 马尔可夫模型(Markov)土地利用需求预测

$$D_{t2} = D_{t1} \times P^{\frac{t2-t1}{a}} \quad (2)$$

式中,  $D_{t2}$ 为 $t2$ 时的用地需求,  $D_{t1}$ 为 $t1$ 时的土地利用状态,  $P$ 为不同年份间土地利用转移矩阵,  $a$ 为年份差.

(2) 未来土地利用类型的模拟与验证

随机森林算法(RFC)是一种基于决策树的综合分类器, 需要从土地利用扩张的图中随机抽取一个样本, 计算不同土地利用类型扩张与影响因子之间的关系, 由此获得不同用地类型分析单元的变化率, 计算公式如下<sup>[18]</sup>:

$$P_{i,k}^d(x) = \frac{\sum_{n=1}^M I[h_n(x) = d]}{M} \quad (3)$$

式中,  $P_{i,k}$ 为土地利用类型 $k$ 在 $i$ 位置扩张的概率;  $d$ 的值为1或0;  $x$ 为影响因子;  $I[h_n(x) = d]$ 为决策树集合的指示函数;  $h_n(x)$ 为影响因子 $x$ 的第 $n$ 棵决策树的预测类型;  $M$ 为决策树的总数.

CA模型通过自适应因子影响土地利用类型, 以达到任意类型所需的数量, 将多类型随机斑块种子与下降阈值相结合, 可实现对土地利用斑块自动生成的时空动态模拟, 公式如下:

$$S_{(t+1)} = f(S_t, N) \quad (4)$$

式中,  $S_t$ 和 $S_{(t+1)}$ 分别为土地利用类型在 $t$ 时刻和 $t+1$ 时刻的状态;  $N$ 为邻近的单元格;  $f$ 为土地利用类型的转换规则.

### 1.3.3 碳储量变化分析

将表1中不同土地利用类型的碳密度数据输入InVEST模型对区域碳储量进行模拟. 公式如下<sup>[28-30]</sup>:

$$C = \sum_{i=1}^n A_i (C_{ai} + C_{bi} + C_{si} + C_{di}) \quad (5)$$

式中,  $C$ 为研究区碳储量;  $i$ 为土地利用类型;  $n$ 为土地利用类型的个数;  $A_i$ 为土地利用类型 $i$ 的面积;  $C_{ai}$ 、 $C_{bi}$ 、 $C_{si}$ 和 $C_{di}$ 分别为 $i$ 种土地利用类型地上生物、地下生物、土壤有机质和死亡有机质的碳密度.

本研究借助Moran's  $I$ 指数分析碳储存在空间集聚特征<sup>[31,32]</sup>, 取值范围是 $[-1, 1]$ . 指数值大于0且越接近1, 表明碳储存在空间上正向相关, 集聚特征越显著; 指数值小于0且越接近-1, 表明碳储存在空间上负相关, 集聚特征越显著; 指数值为0表明碳储存在空间分布上是离散的<sup>[30,33,34]</sup>.

### 1.3.4 未来模拟情景设定

根据研究区的土地利用变化特征, 利用CA-Markov模型模拟自然趋势情景(natural trend scenario,

NT)、建设用地优先情景(built-up land priority scenario, BP)和生态优先情景(ecological priority scenario, EP)下2030年的土地利用类型.其中:  
①自然趋势情景假设未来土地利用变化将延续前一时期的变化趋势;②建设用地优先情景,即经济发展加快,其他土地利用类型转化为建设用地的比例增加.模拟中将耕地、林地、草地和裸地向建设用地转移概率增加20%,建设用地向其余用地类型的转移概率降低20%;③生态优先情景,结合2020年提出的“双碳”目标,将生态保护放在重要位置,限制森林、草地和湿地等向其他土地利用类型的转换.模拟中将耕地、林地和草地向建设用地转移的概率降低20%,湿地和向建设用地转换的

概率降低30%<sup>[30,35]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用和碳储量的动态变化

#### 2.1.1 土地利用变化特征

如表3所示,粤港澳大湾区的主要用地类型是林地,2000~2020年的占比分别是52.75%、53.20%和50.83%,呈下降趋势,空间分布于东、北、西三面丘陵台地(图2).耕地面积次之,亦呈现不断下降的趋势.建设用地面积占比从2000年的7.57%增加至2020年的16.25%,集中于中部平原及环珠江口沿岸城市.巨大的人口和资本流动是20年来建设用地迅速扩张的重要原因<sup>[24]</sup>.

表3 2000~2020年粤港澳大湾区土地利用类型变化  
Table 3 Changes in LULC type in the GBA from 2000 to 2020

年份	耕地		林地		草地		湿地		水体		建设用地		裸地		无数据	
	面积 /km <sup>2</sup>	占比 /%														
2000	13 429.04	24.72	28 677.18	52.75	3 634.06	6.68	33.33	0.06	4 067.61	7.48	4 117.36	7.57	16.64	0.03	388.00	0.71
2010	12 497.11	22.97	28 919.16	53.20	3 721.77	6.85	8.61	0.02	3 917.52	7.21	4 901.43	9.02	11.71	0.02	385.90	0.71
2020	10 511.58	19.34	27 633.78	50.83	3 002.52	5.52	16.25	0.03	3 994.41	7.35	8 833.13	16.25	6.99	0.01	364.57	0.67

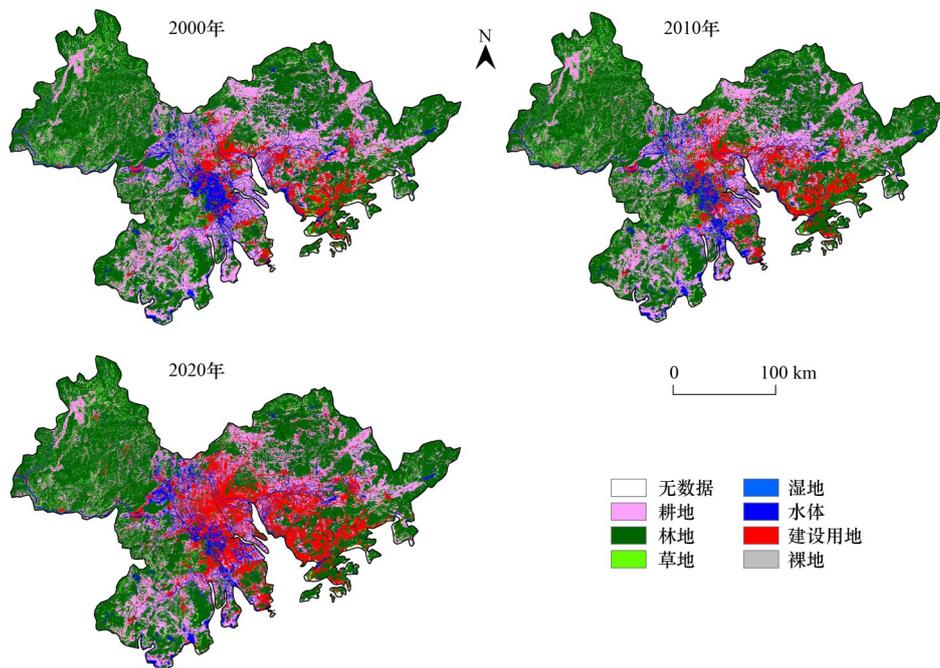


图2 2000~2020年粤港澳大湾区土地利用空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of LULC in the GBA from 2000 to 2020

2000~2020年,粤港澳大湾区土地利用类型总转移面积12 177.44 km<sup>2</sup>,两个阶段的转移面积分别为8 547.89 km<sup>2</sup>(2000~2010年)和8 419.08 km<sup>2</sup>(2010~2020年),见图3.不同阶段,均以耕地的面积变化最为显著,主要转换为林地(2000~2010年)和建设用地(2010~2020年).另外,受生态保护政策的影响,部分耕地转变为水体.2000~2010年,耕地分别

向建设用地和水体转出655.61 km<sup>2</sup>和835.72 km<sup>2</sup>.2010~2020年,耕地分别向建设用地和水体转出2 228.33 km<sup>2</sup>和642.43 km<sup>2</sup>.第二阶段耕地向建设用地的转换面积约是第一阶段的3.4倍,主要受到国家发展政策的支持.2008年《珠江三角洲地区改革发展规划纲要(2008~2020)》发布,2009年粤港澳三地编制《大珠江三角洲城镇群协调发展研究》,

2019年《粤港澳大湾区发展规划纲要》出台，提出了大湾区的基本原则、战略定位、发展目标和空间布局，在一系列政策的支持下，粤港澳三地深入开展合作，经济往来和区域建设的步伐显著加快。另

外，2000~2010年耕地转为水体的面积大于2010~2020年的转换面积，归因于粤港澳大湾区在第二阶段较快的发展速率，尽管有政策法规提出保护水体，仍不可避免被占用。

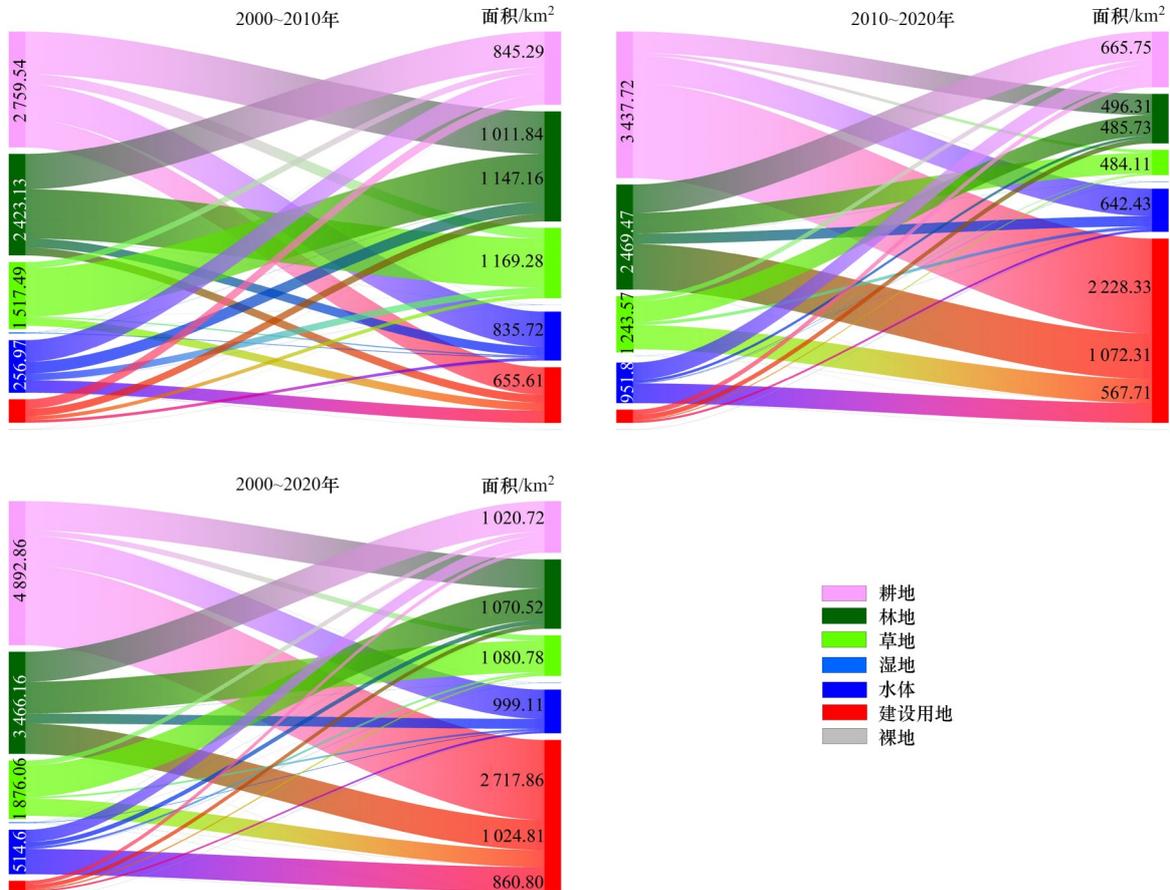


图3 不同时期粤港澳大湾区土地利用转移矩阵  
Fig. 3 LULC transfer matrix of GBA in different periods

### 2.1.2 碳储量的动态变化

粤港澳大湾区2000、2010和2020年的碳储量分别为  $573.59 \times 10^6$ 、 $573.31 \times 10^6$  和  $553.47 \times 10^6$  Mg，累计损失了  $20.12 \times 10^6$  Mg。2000~2020年碳储量的 Moran's I 指数值分别为 0.811 6、0.828 5 和 0.825 8，表明其空间分布集中，高密度的碳储存区集中于东、北、西三面丘陵和台地地区，最高值为  $25.15 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ；低密度的碳储存区集中于珠江口沿岸的广州市、深圳市、中山市、东莞市、珠海市和佛山市，最低值为 0(图4)。总体来看，空间分布格局呈现出“中部平原低、三面环山高”的特点，在过去 20 a 保持相对稳定。

为进一步分析粤港澳大湾区碳储量的局部变化特征，通过栅格计算将空间变化值分为 3 类：增加 ( $0 \sim 25.15$ )、减少 ( $-25.15 \sim 0$ ) 和基本不变 (0)。如图 5 所示，2000~2020 年，东、北、西三面的丘陵和台地碳储量基本稳定，土地类型以林地和草地为主。

碳储量增加区仅 7.12%，空间分布零散。碳储量下降区占比 14.20%，集中于环珠江口沿岸城市，这些地区的城市化水平高，土地开发利用程度大，人口密集，对建设用地需求高，开发过程中生态空间被蚕食，导致区域碳储量不断下降。分阶段来看，碳储量基本稳定区占比达 85%，增加区和减少区的占比存在一定差异。2000~2010 年，碳储量增加区和减少区分别占 7.20% 和 7.38%，增加区空间分布零散，减少区集中于各市的中心城区；2010~2020 年，碳储量增加区占比减少，仅为 3.35%，减少区占比增加至 10.43%，空间分布范围明显扩大，城市发展水平相对较低的江门、肇庆和惠州等边缘城市随着建设用地面积的增加，碳储量降低。

### 2.2 土地利用变化对碳储量的影响

粤港澳大湾区不同土地利用类型的面积及碳密度均影响区域碳储量。例如，耕地的碳密度值  $7.37 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，随着面积下降，碳储量从 2000 年的

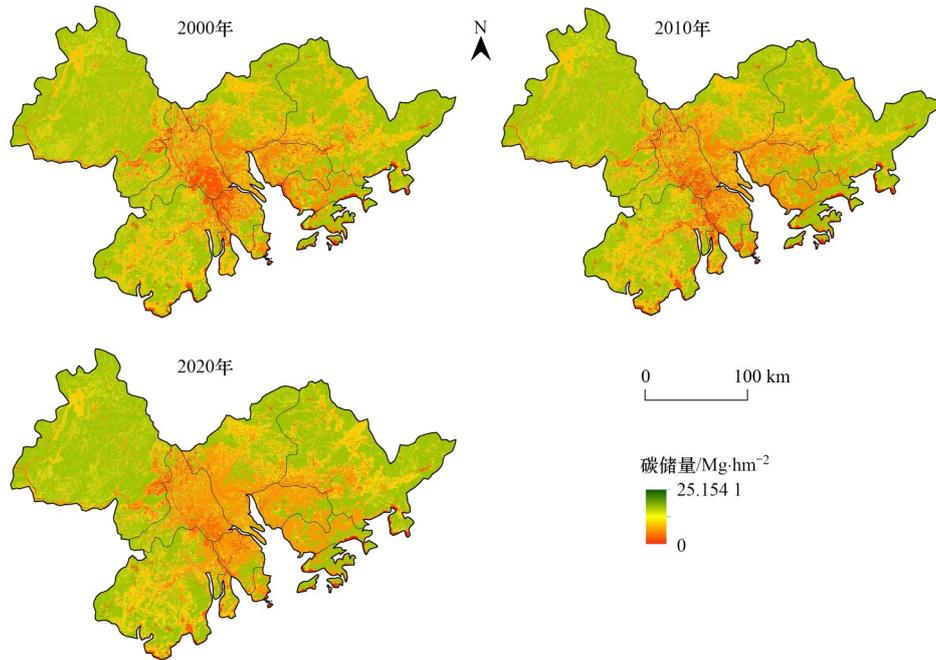


图4 2000~2020年粤港澳大湾区碳储存空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of carbon storage in the GBA from 2000 to 2020

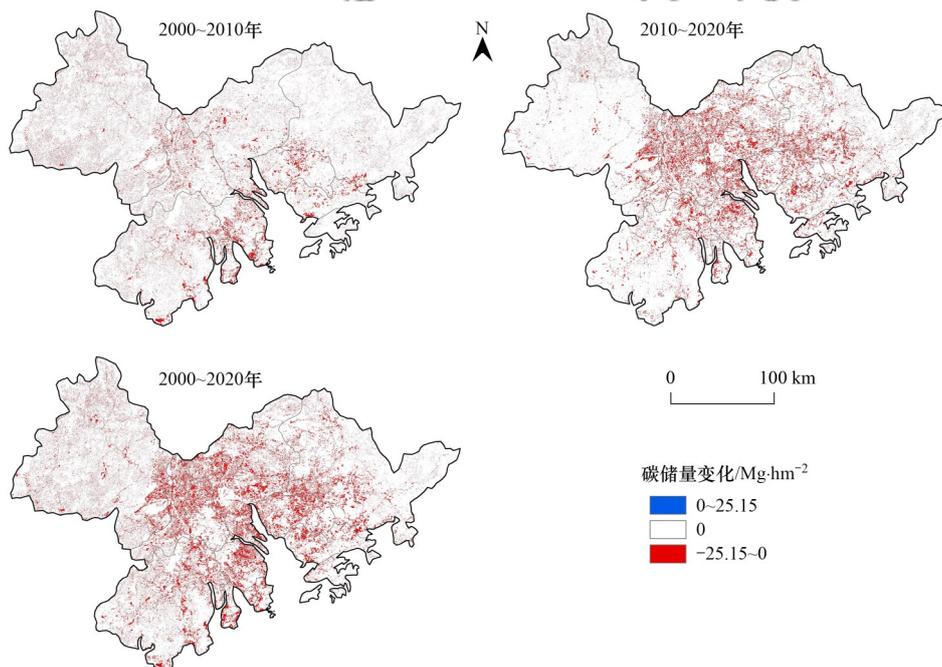


图5 不同时期粤港澳大湾区碳储存变化空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of carbon storage changes in the GBA during different periods

110.25 $\times 10^6$  Mg减少为2020年的86.27 $\times 10^6$  Mg. 林地的碳密度值(12.132 Mg $\cdot$ hm $^{-2}$ )较高, 碳储量亦占比较大(67%). 不同用地类型之间的转换改变了区域碳储量及其空间格局, 耕地、林地和建设用地是影响粤港澳大湾区碳储量变化的主要地类.

2000~2020年, 粤港澳大湾区从耕地向其它地类转换导致的碳储存损失量为607 524.60 Mg(表4). 耕地向建设用地的转换面积最大, 为2 717.86 km $^2$ ,

损失了667 533.57 Mg的碳. 随着粤港澳大湾区建设规划的快速推进, 区域建设的步伐加快, 2010年之后耕地向建设用地的转换速率明显快于2010年之前, 由此导致的碳储存损失率是之前的3.40倍. 耕地向林地(990.4 km $^2$ )、草地(181.72 km $^2$ )和湿地(0.64 km $^2$ )的转变受益于国家退耕还林还湿的生态政策, 碳储量增加了523 704.57 Mg. 鉴于湿地(25.15 Mg $\cdot$ hm $^{-2}$ )的碳密度高于林地(12.13 Mg $\cdot$ hm $^{-2}$ )和草地

( $10.19 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 其转换面积虽小, 碳储量仍增加了  $1\,138.75 \text{ Mg}$ .

2000~2020年, 林地分别向耕地和草地转出  $1020.72 \text{ km}^2$  和  $1\,080.78 \text{ km}^2$ , 导致碳储量损失了  $696\,267.61 \text{ Mg}$ (表5). 其中, 向耕地转变导致的碳损耗量大, 主要因为耕地的碳密度值低于草地, 转换面积相当的情况下, 耕地的碳损耗大于草地. 此外, 林地向建设用地转换的过程也导致了大量的碳损

耗, 以2010年为界, 2010~2020年林地向建设用地的转换面积约为2000~2010年转换面积的5.64倍, 造成了  $739\,525.05 \text{ Mg}$  的碳损耗. 归因于研究区一系列发展政策[2008年《珠江三角洲地区改革发展规划纲要(2008~2020)》和2009年《大珠江三角洲城市群协调发展研究》]的支持, 建设步伐加快, 对建设用地的需求量提升, 林地被侵占的过程导致区域碳储量降低.

表4 耕地向其它用地类型转变导致的碳储存变化量

Table 4 Changes in carbon storage of the conversion from cropland to other types

变化类型	2000~2010年		2010~2020年		2000~2020年	
	面积/ $\text{km}^2$	碳储量/ $\text{Mg}$	面积/ $\text{km}^2$	碳储量/ $\text{Mg}$	面积/ $\text{km}^2$	碳储量/ $\text{Mg}$
耕地→林地	1 011.84	481 644.65	496.31	236 246.98	990.40	471 440.55
耕地→草地	252.90	71 150.19	68.38	19 238.78	181.72	51 125.27
耕地→湿地	0.94	1 678.69	1.00	1 778.22	0.64	1 138.75
耕地→水体	835.72	-387 508.35	642.43	-297 879.99	999.11	-463 269.58
耕地→建设用地	655.61	-161 024.72	2 228.33	-547 299.41	2 717.86	-667 533.57
耕地→裸地	2.53	-345.20	1.28	-174.43	3.12	-426.02

表5 林地向其它用地类型转变导致的碳储存变化量

Table 5 Changes in carbon storage of the conversion from forest to other types

变化类型	2000~2010年		2010~2020年		2000~2020年	
	面积/ $\text{km}^2$	碳储量/ $\text{Mg}$	面积/ $\text{km}^2$	碳储量/ $\text{Mg}$	面积/ $\text{km}^2$	碳储量/ $\text{Mg}$
林地→耕地	845.29	-402 365.35	665.75	-316 903.31	1 020.72	-485 871.68
林地→草地	1 169.28	-227 623.55	484.11	-94 242.14	1 080.78	-210 395.93
林地→湿地	1.00	1 302.21	3.00	3 906.63	5.00	6 511.05
林地→水体	217.41	-204 299.29	241.93	-227 343.02	333.41	-313 302.76
林地→建设用地	190.14	-137 210.75	1 072.31	-773 798.75	1 024.81	-739 525.05
林地→裸地	0.00	0.00	2.36	-1 447.31	1.43	-877.96

2000~2020年, 建设用地面积增加导致的碳储存减少量为  $1\,530\,658.32 \text{ Mg}$ (表6). 耕地和林地向建设用地转换引起的碳损失量占92%, 草地和湿地向建设用地的转换导致的碳损失量约  $311\,314.22 \text{ Mg}$ . 水体向建设用地的转变使得碳储量增加了  $187\,714.52 \text{ Mg}$ , 由于水体具有很高的生态价值, 一般来说应该

得到更多的保护, 然而粤港澳大湾区在土地利用的过程中部分水体被侵占为建设用地, 这种建设用地的扩张存在一定的不合理性. 以2010年为界, 2010~2020年各地类向建设用地的转换速率快于2000~2010年的转换速率, 受此影响的碳储存损失速率也呈现类似特征.

表6 其它用地类型向建设用地转变导致的碳储存变化量

Table 6 Changes in carbon storage of the conversion from other types to built-up land

变化类型	2000~2010年		2010~2020年		2000~2020年	
	面积/ $\text{km}^2$	碳储量/ $\text{Mg}$	面积/ $\text{km}^2$	碳储量/ $\text{Mg}$	面积/ $\text{km}^2$	碳储量/ $\text{Mg}$
耕地→建设用地	655.61	-161 024.72	2 228.33	-547 299.41	2 717.86	-667 533.57
林地→建设用地	190.14	-137 210.75	1 072.31	-773 798.75	1 024.81	-739 525.05
草地→建设用地	187.35	-98 723.17	567.71	-299 156.86	575.42	-303 218.90
湿地→建设用地	0.00	0.00	0.66	-1 341.98	4.00	-8 095.32
水体→建设用地	293.56	64 016.99	461.97	100 741.37	860.80	187 714.52
裸地→建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

### 2.3 模拟情景下土地利用和碳储量的变化

为验证 PLUS 模型对景观类型模拟结果的可靠性, 本文分别以2000年和2010年的土地覆被数据为

基础, 结合自然因素和社会经济因素这两方面的10个影响因子获取各地类发展概率. 基于 CA 模型, 并设置相关参数, 模拟得到2010年和2020年土地利用

分布,与实际土地利用分布格局进行比较.精度验证值分别为0.869 6和0.856 2, Kappa系数为0.810 2和0.783 66, FoM为0.139 8和0.121 2,表明模型模拟精度较高,PLUS模型可用于粤港澳大湾区未来土地利用变化的模拟研究.

如表7所示,3种发展情景下,到2030年建设用地面积(km<sup>2</sup>)快速扩张,分别为:3 175.95(NT)、3 826.54(BP)和2 429.85(EP).同时期,耕地、林地

和草地的面积不同程度地减少,其中,BP情景下3种地类面积的减少量最大,NT情景的减少量次之,EP情景下的减少量最小.另外,NT和BP情景下,水体的面积也有所减少.受土地利用类型变化的影响,3种情景下碳储量分别为 $537.59 \times 10^6$ 、 $534.77 \times 10^6$ 和 $540.17 \times 10^6$  Mg,均低于2020年的碳储量,表明模拟情景下粤港澳大湾区的碳排放量依然是增长的,但增加趋势有所降低.

表7 2030年不同情景下土地利用类型面积及碳储量

Table 7 Area and carbon storage of LULC type under different scenarios in 2030

类型	NT		BP		EP	
	面积/km <sup>2</sup>	碳储量×10 <sup>6</sup> /Mg	面积/km <sup>2</sup>	碳储量×10 <sup>6</sup> /Mg	面积/km <sup>2</sup>	碳储量×10 <sup>6</sup> /Mg
耕地	9 027.58	73.94	8 661.97	70.95	70 729.18	76.80
林地	26 410.86	356.02	26 182.36	352.94	2 895.35	358.77
草地	2 605.12	29.48	2 586.20	29.27	3 946.64	30.15
湿地	18.78	0.52	19.53	0.55	2 179.03	0.50
水体	3 942.33	11.98	3 908.03	11.88	8 337.06	12.38
建设用地	12 009.08	65.59	12 659.67	69.15	20 745.20	61.52
裸地	6.99	0.05	6.99	0.05	61.61	0.05

虽然3种情景下的土地利用类型与碳储存在数量上有所不同,但空间分布格局未发生明显变动.建设用地集中于环珠江口的6个城市,港深(香港-深圳)、广佛(广州-佛山)和澳珠(澳门-珠海)极点城市的联合发展使得建设用地空间格局稳步扩张;林地和草地集中分布于东、北、西三面的丘陵和台地地区,耕地的面积占比较小,零散分布于台地和丘陵间(图6).与土地利用类型的空间分布模式相对

应,碳储存高值和中值区集中于台地和丘陵地区,低值区集中于大湾区各市的中心城区,以伶仃洋东西两岸的城市为主(图7).模拟2030年3种发展情景下的碳储量,结果显示EP情景的碳储量最大,BP情景的碳储量最小,这表明以扩展建设用地为主导的发展方式对生态的负面影响日益加剧<sup>[36]</sup>,为实现“双碳”目标,促进大湾区经济的可持续发展,需要采取有利的生态发展措施.

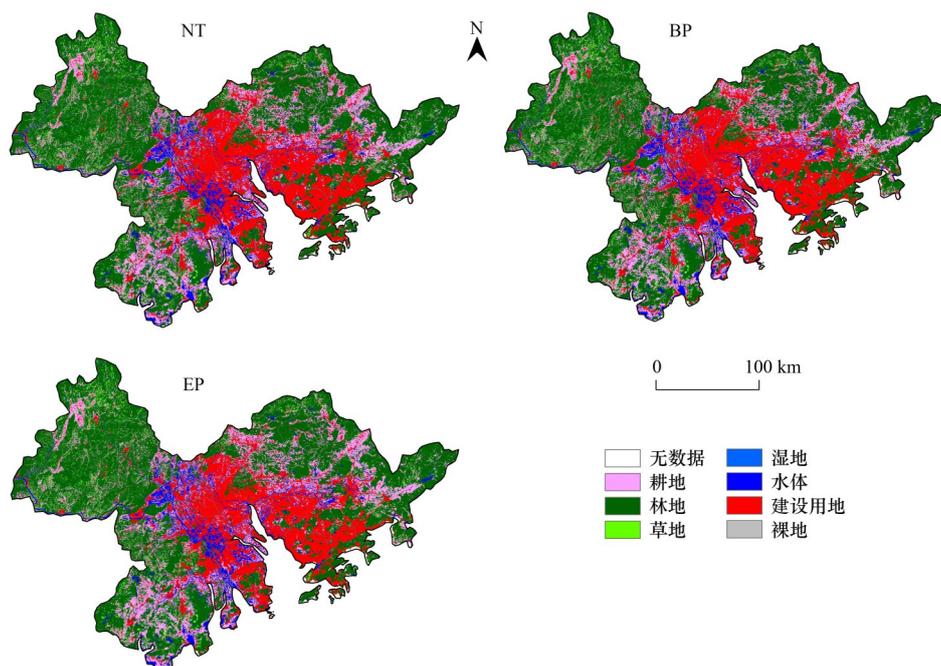


图6 2030年不同情景下粤港澳大湾区土地利用类型空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of LULC type in the GBA under different scenarios in 2030

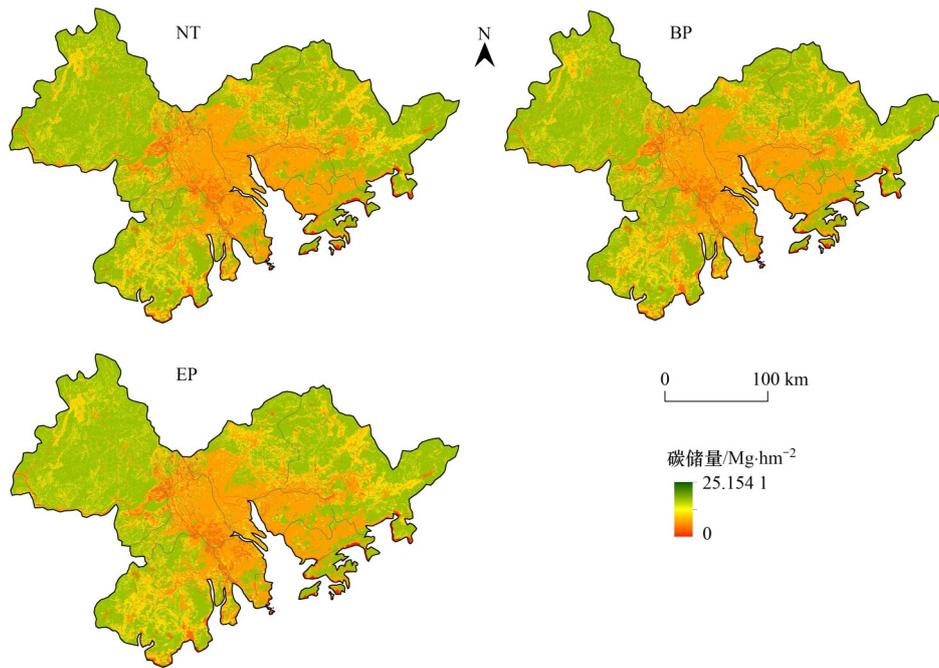


图7 2030年不同情景下粤港澳大湾区碳储量空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of carbon storage in the GBA under different scenarios in 2030

### 3 讨论

#### 3.1 碳储量的演化机制

土地利用系统一方面受人类活动的影响, 另一方面又影响着社会的发展. 本文以粤港澳大湾区为例分析了2000~2020年土地利用与碳储量的动态演化特征, 结果表明碳储量的局部变化反映了土地利用类型的转变, 主要包括碳储量增加、减少和基本不变这3种类型. 粤港澳大湾区碳储量相对稳定地区的主要用地类型是林地和草地, 碳密度和面积占比未显著变化的情况下, 碳储量保持不变; 碳储量增加区空间分布零散, 其用地类型由碳密度值较低的耕地转变为碳密度值较高的林地、草地或湿地, 面积占比较小; 碳储量减少的中部平原区主要受碳密度值较低的建设用地面积增加和碳密度值较高的耕地、林地和草地面积减少的影响.

21世纪以来, 粤港澳大湾区的建设用地面积一直高速扩张, 这是社会经济迅速发展的结果, 但也带来了碳储量减少的负面影响, 这一点与很多学者的研究结果一致. Li等<sup>[37]</sup>以武汉市为例研究发现城市扩张导致碳储量减少了2.62 Tg(2000~2015年). Xiang等<sup>[38]</sup>同样研究发现重庆市的碳储量减少了5.78 Tg(2000~2020年), 建设用地对其他用地类型的侵占是最主要的原因. 生态政策的影响下, 城市的发展仍以侵占耕地为主. 建设用地对耕地的侵占以及城市化过程中出现的各类问题导致区域生态碳储量的降低. Sadat等<sup>[39]</sup>对伊朗Qaem Shahr县的研究发现

城镇化的发展和建设用地的增加对减少区域碳储量有巨大的影响. 基于土地利用类型与碳储量之间的密切联系, 在未来人地耦合开发过程中, 需要将碳储存作为规划的重要参考因素, 实现最优权衡.

#### 3.2 优化策略

土地利用和区域碳储量存在时间和空间差异, 粤港澳大湾区作为我国重要的经济板块, 集各项优势发展政策于一身, 生态区位极其重要. 伴随着《粤港澳大湾区发展规划纲要》的印发, 区域发展将进一步加速, 生态环境压力增大. 为实现“双碳”目标, 促进区域可持续发展, 建议从以下几方面采取措施.

首先, 林地作为粤港澳大湾区的主要用地类型及碳库, 在发展的过程中应加强森林的保护和管理, 保障其主导地位, 减少或最大限度地避免对林地的侵占. 其次, 耕地作为被侵占最大的用地类型, 可以从两方面对其进行保护. 一方面, 耕地与林地一样具有较强的固碳能力<sup>[40]</sup>, 农作物自身生长可以进行碳吸收, 农田土壤可以固碳, 秸秆还田亦可以增强土壤碳储量<sup>[41]</sup>. 因此, 提高耕地的利用效率是一种有效的方式. 另一方面, Jiang等<sup>[42]</sup>研究发现加强耕地的保护有助于减缓长株潭城市群碳储功能的下降. 因此, 确保耕地面积, 严禁不合理的占用亦是行之有效的措施.

除此以外, 在《粤港澳大湾区发展规划纲要》中, 大湾区将继续推进极点带动、轴带支撑、辐射周边的空间发展格局, 对建设用地的优化布局将有

助于区域的可持续发展.与建筑业相比,高科技产业和智慧密集型产业占用的耕地、林地和草地面积较小<sup>[43]</sup>,发展技术导向型产业将优化区域经济发展模式.政府部门还可以增强土地利用功能的复杂性,通过建设生产性城市提高建设用地集约节约能力,逐渐形成平衡协调、低碳发展的土地利用格局<sup>[44]</sup>.

### 3.3 研究不足

本文研究基本厘清了粤港澳大湾区土地利用与碳储量变化之间关系,为区域发展规划的制定提供了理论依据,但仍存在一些不足.首先,对区域生态系统碳储量的评估一方面取决于碳密度数据,一方面取决于已有土地利用数据及其模拟结果.局限于数据的可得性,评估中使用的碳密度数据在研究区内假定不变,但实际不同土地利用类型的碳密度存在动态变化.未来的研究需要通过连续监测或者实地调研,获取研究区多年动态碳密度数据.其次,利用PLUS模型对未来土地利用数据模拟的过程中,选定了自然和社会经济两方面多项因子,虽然模拟结果较好,但仍无法避免模型本身的局限性.例如,相关规划及政策措施难以量化,会在很大程度上影响土地利用模拟的结果,未来需要继续优化模型,将定性、定量因素综合纳入考量.最后,基于研究结果提出的发展建议,其应用效果需要在未来进一步验证和探讨.

## 4 结论

(1)粤港澳大湾区的主要用地类型是林地,受生态保护政策的影响,其面积占比在过去20年保持在50%左右,耕地(减少5.38%)和建设用地(增加8.68%)是变化最显著的2种地类,其余土地利用类型的变化较小.

(2)受不同用地类型转换的影响,研究区的碳储量减少了 $20.12 \times 10^6$  Mg,耕地和林地面积的减少以及建设用地面积的增加是导致碳损耗的主要原因.与土地利用类型的空间分布格局一致,碳储存在空间分布上呈现集聚特征.高值区集中于东、北、西三面的丘陵和台地地区,主要用地类型为草地和林地;低值区集中于中部平原及环珠江口的城市中心,主要用地类型为建设用地.

(3)2030年模拟情景中,粤港澳大湾区的碳储量均低于2020年的碳储量.相比而言,生态优先情景将增加 $2.58 \times 10^6$  Mg的碳,是大湾区未来发展的最优路径.“双碳”目标下,加强森林的保护和管理,保持耕地面积,提高农作物的碳汇能力可以有效提高碳固存.此外,政府应当转变经济发展方式,适当控制建设用地的扩张,加强核心区建设用地的

集约利用,减少城市扩张对碳平衡的影响.

### 参考文献:

- [1] Bellard C, Marino C, Courchamp F. Ranking threats to biodiversity and why it doesn't matter[J]. *Nature Communications*, 2022, **13** (1), doi: 10.1038/s41467-022-30339-y.
- [2] Li G D, Fang C L, Li Y J, *et al.* Global impacts of future urban expansion on terrestrial vertebrate diversity [J]. *Nature Communications*, 2022, **13** (1), doi: 10.1038/s41467-022-29324-2.
- [3] Stankovic M, Ambo-Rappe R, Carly F, *et al.* Quantification of blue carbon in seagrass ecosystems of Southeast Asia and their potential for climate change mitigation [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **783**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146858.
- [4] Liang Y J, Hashimoto S, Liu L J. Integrated assessment of land-use/land-cover dynamics on carbon storage services in the Loess Plateau of China from 1995 to 2050 [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **120**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106939.
- [5] Zhao Z Q, Sharifi A, Dong X, *et al.* Spatial variability and temporal heterogeneity of surface urban heat island patterns and the suitability of local climate zones for land surface temperature characterization [J]. *Remote Sensing*, 2021, **13** (21), doi: 10.3390/rs13214338.
- [6] Houghton R A. Carbon emissions and the drivers of deforestation and forest degradation in the tropics [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2012, **4** (6): 597-603.
- [7] Landman W. Climate change 2007: the physical science basis [J]. *South African Geographical Journal*, 2010, **92** (1): 86-87.
- [8] Zhang M, Huang X J, Chuai X W, *et al.* Impact of land use type conversion on carbon storage in terrestrial ecosystems of China: a spatial-temporal perspective [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**, doi: 10.1038/srep10233.
- [9] Kertész Á, Nagy L A, Balázs B. Effect of land use change on ecosystem services in Lake Balaton Catchment [J]. *Land Use Policy*, 2019, **80**: 430-438.
- [10] Nie X, Lu B, Chen Z P, *et al.* Increase or decrease? Integrating the CLUMondo and InVEST models to assess the impact of the implementation of the Major Function Oriented Zone planning on carbon storage [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **118**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106708.
- [11] Tang L P, Ke X L, Zhou Q S, *et al.* Projecting future impacts of cropland reclamation policies on carbon storage [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **119**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106835.
- [12] Pan Z Z, He J H, Liu D F, *et al.* Predicting the joint effects of future climate and land use change on ecosystem health in the Middle Reaches of the Yangtze River Economic Belt, China [J]. *Applied Geography*, 2020, **124**, doi: 10.1016/j.apgeog.2020.102293.
- [13] Zhou J J, Zhao Y R, Huang P, *et al.* Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem carbon storage of inland river basin in arid area, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **118**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106803.
- [14] Wang Q X, Masataka W, Ouyang Z. Simulation of water and carbon fluxes using BIOME-BGC model over crops in China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, **131** (3-4): 209-224.
- [15] Quesada B, Arneth A, Robertson E, *et al.* Potential strong contribution of future anthropogenic land-use and land-cover change to the terrestrial carbon cycle [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, **13** (6), doi: 10.1088/1748-9326/aac4e3.
- [16] Nurwanda A, Zain A F M, Rustiadi E. Analysis of land cover changes and landscape fragmentation in Batanghari Regency, Jambi Province [J]. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*,

- 2016, **227**: 87-94.
- [17] Tan Z, Guan Q Y, Lin J K, *et al.* The response and simulation of ecosystem services value to land use/land cover in an oasis, Northwest China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, **118**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106711.
- [18] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, *et al.* Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, **85**, doi: 10.1016/j.compenurbysys.2020.101569.
- [19] Thompson T M. Modeling the climate and carbon systems to estimate the social cost of carbon[J]. *WIREs Climate Change*, 2018, **9**(5), doi: 10.1002/wcc.532.
- [20] Liu Q, Yang D D, Cao L, *et al.* Assessment and prediction of carbon storage based on land use/land cover dynamics in the tropics: a case study of Hainan Island, China[J]. *Land*, 2022, **11** (2), doi: 10.3390/land11020244.
- [21] Li C, Ng M K, Tang Y Z, *et al.* From a 'world factory' to China's bay area: a review of the outline of the development plan for the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Planning Theory & Practice*, 2022, **23**(2): 310-314.
- [22] 吴佩君, 刘小平, 黎夏, 等. 基于InVEST模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估——以广东省为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2016, **32**(5): 22-28, 36.  
Wu P J, Liu X P, Li X, *et al.* Impact of urban expansion on carbon storage in terrestrial ecosystems based on InVEST Model and CA: A case study of Guangdong Province, China[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2016, **32**(5): 22-28, 36.
- [23] 林彬, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于InVEST-PLUS模型的碳储量空间关联性及其预测——以广东省为例[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(10): 4827-4839.  
Lin T, Yang M Z, Wu D F, *et al.* Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model—a case study in Guangdong Province [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(10): 4827-4839.
- [24] 吴隽宇, 张一蕾, 江伟康. 粤港澳大湾区生态系统碳储量时空演变[J]. *风景园林*, 2020, **27**(10): 57-63.  
Wu J Y, Zhang Y L, Jiang W K. Spatio-temporal evolution of ecosystem carbon storage in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Landscape Architecture*, 2020, **27**(10): 57-63.
- [25] 吴隽宇, 江伟康, 黄钰婷. 粤港澳大湾区生态系统服务价值时空演变研究[J]. *南方建筑*, 2022, (6): 52-61.  
Wu J Y, Jiang W K, Huang Y T. Spatial-temporal changes of ecosystem service value in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *South Architecture*, 2022, (6): 52-61.
- [26] 林媚珍, 刘汉仪, 周汝波, 等. 多情景模拟下粤港澳大湾区生态系统服务评估与权衡研究[J]. *地理研究*, 2021, **40**(9): 2657-2669.  
Lin M Z, Liu H Y, Zhou R B, *et al.* Evaluation and trade-offs of ecosystem services in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area under multi-scenario simulation[J]. *Geographical Research*, 2021, **40**(9): 2657-2669.
- [27] Chuai X W, Huang X J, Lai L, *et al.* Land use structure optimization based on carbon storage in several regional terrestrial ecosystems across China [J]. *Environmental Science & Policy*, 2013, **25**: 50-61.
- [28] Lai L, Huang X J, Yang H, *et al.* Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010 [J]. *Science Advances*, 2016, **2**(11), doi: 10.1126/sciadv.1601063.
- [29] Clerici N, Cote-Navarro F, Escobedo F J, *et al.* Spatio-temporal and cumulative effects of land use-land cover and climate change on two ecosystem services in the Colombian Andes[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **685**: 1181-1192.
- [30] Zheng H L, Zheng H F. Assessment and prediction of carbon storage based on land use/land cover dynamics in the coastal area of Shandong Province[J]. *Ecological Indicators*, 2023, **153**, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110474.
- [31] Bosso L, Smeraldo S, Russo D, *et al.* The rise and fall of an alien: why the successful colonizer *Littorina saxatilis* failed to invade the Mediterranean Sea[J]. *Biological Invasions*, 2022, **24**(10): 3169-3187.
- [32] Liu Y, Tian J W, Zheng W F, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of haze and pollution particles in China based on spatial statistics[J]. *Urban Climate*, 2022, **41**, doi: 10.1016/j.uclim.2021.101031.
- [33] Li H, Huang K, Fu Q Y, *et al.* Airborne black carbon variations during the COVID-19 lockdown in the Yangtze River Delta megacities suggest actions to curb global warming [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2022, **20**(1): 71-80.
- [34] Zheng H L, Li H. Spatial-temporal evolution characteristics of land use and habitat quality in Shandong Province, China[J]. *Scientific Reports*, 2022, **12**(1), doi: 10.1038/s41598-022-19493-x.
- [35] 李琛, 高彬, 吴映梅, 等. 基于PLUS模型的山区城镇景观生态风险动态模拟[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, **39**(1): 84-94.  
Li C, Gao B P, Wu Y M, *et al.* Dynamic simulation of landscape ecological risk in mountain towns based on PLUS model[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, **39**(1): 84-94.
- [36] Carpio A, Ponce-Lopez R, Lozano-García D F. Urban form, land use, and cover change and their impact on carbon emissions in the Monterrey Metropolitan area, Mexico [J]. *Urban Climate*, 2021, **39**, doi: 10.1016/j.uclim.2021.100947.
- [37] Li L, Song Y, Wei X H, *et al.* Exploring the impacts of urban growth on carbon storage under integrated spatial regulation: A case study of Wuhan, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **111**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106064.
- [38] Xiang S J, Wang Y, Deng H, *et al.* Response and multi-scenario prediction of carbon storage to land use/cover change in the main urban area of Chongqing, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, **142**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109205.
- [39] Sadat M, Zoghi M, Malekmohammadi B. Spatiotemporal modeling of urban land cover changes and carbon storage ecosystem services: case study in Qaem Shahr County, Iran [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2020, **22**(8): 8135-8158.
- [40] Sasaki N, Myint Y Y, Abe I, *et al.* Predicting carbon emissions, emissions reductions, and carbon removal due to deforestation and plantation forests in Southeast Asia [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **312**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127728.
- [41] 吴昊玥, 孟越, 黄瀚蛟, 等. 中国耕地低碳利用绩效测算与时空分异[J]. *自然资源学报*, 2022, **37**(5): 1148-1163.  
Wu H Y, Meng Y, Huang H J, *et al.* Estimation and spatio-temporal divergence of the low-carbon performance of cropland use in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, **37**(5): 1148-1163.
- [42] Jiang W G, Deng Y, Tang Z H, *et al.* Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CLUE-S and the InVEST models [J]. *Ecological Modelling*, 2017, **345**: 30-40.
- [43] Liu Y Z, Yang R J, Sun M Y, *et al.* Regional sustainable development strategy based on the coordination between ecology and economy: a case study of Sichuan Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **134**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108445.
- [44] Song Q J, Liu T L, Qi Y. Policy innovation in low carbon pilot cities: lessons learned from China[J]. *Urban Climate*, 2021, **39**, doi: 10.1016/j.uclim.2021.100936.

## CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China .....	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency .....	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition .....	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing .....	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University .....	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing .....	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China .....	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Chinese Cities .....	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shandong, and Henan from 2017 to 2021 .....	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period .....	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM <sub>2.5</sub> Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter .....	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei .....	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Liaocheng City .....	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa .....	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries .....	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes .....	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment .....	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River .....	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang .....	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China .....	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes .....	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin .....	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin .....	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City .....	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network .....	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed .....	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus .....	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects .....	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation .....	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism .....	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar .....	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin .....	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake .....	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River .....	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers .....	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process .....	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area .....	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost .....	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field .....	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics .....	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N <sub>2</sub> O Emission: A Meta-analysis .....	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model .....	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction .....	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning .....	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity .....	LU Ze-rang, CHEN Jia-yan, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohu River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall .....	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chang, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity .....	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil .....	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain .....	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites .....	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou .....	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China .....	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing .....	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines .....	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil .....	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems .....	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)